

Primena algoritma za redukovanje otpada u analizi uticaja na životnu sredinu: primer proizvodnje bitumena

Marina A. Savić¹, Mića B. Jovanović², Jelena D. Tanasijević¹, Ozren J. Očić³, Aleksandar M. Spasić⁴, Predrag B. Jovanić⁵, Ivan D. Nikolić³

¹Inovacioni centar Tehnološko–metalurškog fakulteta, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

²Tehnološko–metalurški fakultet, Univerzitet u Beogradu, Beograd, Srbija

³Fakultet za inženjerski internacionalni menadžment, Evropski Univerzitet, Beograd, Srbija

⁴Institut za tehnologiju nuklearnih i drugih mineralnih sirovina, Beograd, Srbija

⁵Institut za multidisciplinarna istraživanja, Beograd, Srbija

Izvod

Algoritam za redukciju otpada (eng. *waste reduction algorithm* – WAR) jeste metodologija koja se može koristiti za procenu potencijalnog uticaja tehnoloških procesa na životnu sredinu. Analizom pojedinačnih stupnjeva procesa proizvodnje dobijaju se podaci koji omogućavaju sagledavanje kritičnih segmenata. Cilj ovog rada je da se sagledaju kritične tačke procesa proizvodnje bitumena sa stanovišta zaštite životne sredine. Definisanjem osnovnih parametara algoritma WAR GUI (eng. *waste reduction algorithm graphical user interface*) softverskog modela dobijene su kvantifikovane vrednosti potencijalnih uticaja na životnu sredinu (eng. *potential environmental impact* – PEI) svakog pojedinačnog stupnja proizvodnog procesa, polazeći od procesa atmosfertske destilacije, preko vakuum destilacije, do procesa dobijanja bitumena iz vakuum ostatka u postrojenju bitumena.

Ključne reči: Algoritam za redukciju otpada • Bitumen • PEI indeksi • Kontrola zagađenja

Dostupno na Internetu sa adrese časopisa: <http://www.ache.org.rs/HI/>

Proces proizvodnje bitumena energetski je veoma zahtevan, sa potencijalno veoma značajnim uticajima na životnu sredinu. Dobijanje bitumena, polazeći od sirove nafte, odvija se kroz tri tehnološka postupka: atmosfertska destilacija sirove nafte, vakuum destilacija i proizvodnja bitumena [1]. Štetne uticaje, koji su rezultat tehnoloških procesa u rafinerijama nafte, neophodno je najpre valjano kvantifikovati [2] i zatim ublažiti primenom tehnika čistije proizvodnje [3]. Upotrebom različitih inženjerskih tehnika i alata, izvori zagađenja se mogu identifikovati i kvantifikovati. Algoritam za redukciju otpada (eng. *waste reduction algorithm* – WAR) jeste metodologija koja se može koristiti za procenu potencijalnog uticaja tehnološkog procesa na životnu sredinu, odnosno za ocenu ekološke prihvatljivosti tehnološkog procesa. Brojni su radovi koji se bave problematikom primene WAR-a u različitim oblastima koje se direktno ili indirektno odnose na zaštitu životne sredine [4–12].

Rezultati dobijeni primenom WAR-a mogu predstavljati osnovu i u ocenama životnog ciklusa proizvoda (eng. *life cycle assessment* – LCA), u delu vezanom za procese proizvodnje [13–15]. LCA analiza obuhvata procenu uticaja nekog proizvoda na životnu sredinu tokom

celog životnog veka, od iskopavanja (vađenja) sirovina do konačnog odlaganja, uključujući praćenje emisija pojedinačnih zagađujućih materija i odgovarajuće procene uticaja na životnu sredinu iz svih izvora. Literatura se relativno malo bavi problematikom uticaja bitumena na životnu sredinu, a inventari životnog ciklusa bitumena (eng. *life cycle inventory* – LCI) potencijalno mogu imati malu tačnost, zbog nepreciznosti raspoloživih podataka [16,17]. Publikovani radovi koji se odnose na procene uticaja bitumena na životnu sredinu uglavnom se bave primenom bitumena u građevinarstvu, preko uticaja asfalta i ostalih građevinskih materijala koji koriste bitumen, na životnu sredinu [16–19].

WAR algoritam su razvili i prvi primenili Hilaly i Sikdar [20]. Ovi autori su uveli koncept balansa zagađenja, metodologiju koja je omogućavala da se prate polutanti kroz proces, dok su Young i Kabez u WAR algoritam uključili PEI indikatore (eng. *potential environmental impact* – PEI). Metoda se zasniva na bilansu potencijalnog uticaja na životnu sredinu (PEI) za hemijske procese. PEI predstavlja relativnu meru potencijala materije da ima negativan efekat na ljudsko zdravlje i životnu sredinu (na primer, akvatična ekotoksikologija, globalno zagrevanje, itd.). Rezultat sume (zbira) PEI indikatora je indeks zagađenja koji daje kvantitativnu meru uticaja procesa na životnu sredinu. Cilj primene metodologije je da se minimizira PEI, umesto da se minimizira količina otpada (zagađujućih materija) koja je emitovana iz procesa [21]. Uticaj na životnu sredinu ocenjuje se na osnovu vrednosti PEI indikatora. Sledeći primer to ilu-

NAUČNI RAD

UDK 66.048:678.049.2:502

Hem. Ind. 65 (2) 197–204 (2011)

doi: 10.2298/HEMIND101108011S

Prepiska: M. Savić, Inovacioni centar Tehnološko–metalurškog fakulteta, Karnegijeva 4, 11000 Beograd, Srbija.

E-pošta: msavic@tmf.bg.ac.rs

Rad primljen: 8. novembar, 2010

Rad prihvaćen: 18. februar, 2011

struje. Postrojenje može da se projekuje tako da, u zavisnosti od modifikacija procesa, može da emituje 100 kg/h otpada koji ima veoma nepovoljan uticaj po životnu sredinu (opcija A), odnosno 200 kg/h otpada koji ima manje nepovoljan uticaj po životnu sredinu, u odnosu na opciju A (opcija B). Da bi se procenio uticaj emisije iz ovih postrojenja na životnu sredinu, odnosno da bi se odredilo koje postrojenje ima manji negativni uticaj, uvode se PEI indikatori [4].

Cilj ovog rada je bio da se raščlanjivanjem procesa proizvodnje bitumena sagledaju kritične tačke proizvodnog procesa sa stanovišta zaštite životne sredine. Definisanjem parametara WAR GUI softverskog modela su bili kvantifikovani uticaji svakog pojedinačnog stupnja u procesu proizvodnje bitumena na životnu sredinu. U okviru svakog od proizvodnih stupnjeva identifikovale se parametri životne sredine na koje se vrši najveći uticaj.

METODOLOGIJA

PEI indikatori ukazuju kakav efekat na životnu sredinu bi mogli imati količine materijala i energije koji učestvuju u procesu proizvodnje kada bi oni bili uzeti iz životne sredine ili bi bili emitovani u nju [5,10]. Analiza obuhvata uticaje ulaznih, izlaznih i otpadnih materijala, kao i energije koja se u procesu utroši ili generiše. Za izračunavanje PEI indikatora korišćen je softverski model WAR GUI koji je razvila Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (eng. *US Environmental Protection Agency – US EPA*) [22]. Primenom ovog softverskog modela dobijeni su podaci o vrednostima sledećih grupa PEI indikatora [23]:

- ukupan izlazni PEI sistema u jedinici vremena – lout PEI/h;
- ukupan izlazni PEI sistema izražen po masi proizvoda – lout PEI/kg;
- ukupan PEI generisan u sistemu u jedinici vremena – lgen PEI/h;
- ukupan PEI generisan u sistemu izražen po masi proizvoda – lgen PEI/kg;
- ukupna emitovana energija iz procesa izražena u jedinici vremena – lenergy PEI/h;
- ukupna emitovana energije iz procesa izražena po masi proizvoda – lenergy PEI/kg.

PEI indikatori koji se odnose na ukupnu emitovanu energiju iz procesa, izraženu u jedinici vremena i po masi proizvoda, opisuju energetska karakteristiku procesa.

Vrednosti PEI indikatora za materijal k formiraju se na osnovu vrednosti PEI kategorija za taj materijal prema sledećoj jednačini [4]:

$$\Psi_k = \sum_i \alpha_i \Psi_{ki} \quad (1)$$

Gde je: Ψ_k – PEI indikator, α_i – težinski faktor uticaja kategorije i Ψ_{ki} – PEI kategorija.

Težinski faktor α_i koristi se da bi se izrazio značaj uticaja kategorija u konkretnom slučaju. Vrednost težinskog faktora izražava se skalom od 0 do 10, ali to nije strogo pravilo. Vrednost težinskog faktora dodeljuje se u zavisnosti od uslova procesa, a njegovo podešavanje treba da naglasi probleme relevantne za konkretan proces u zavisnosti od uslova i lokacije. Na primer, ukoliko se proces izvodi u blizini značajnih vodenih tokova, vrednost težinskog faktora za potencijal akvatične toksičnosti trebalo bi da ima dominantnu vrednost. Osnovni značaj težinskih faktora za ovu metodologiju je u tome što oni dozvoljavaju kombinovanje specifičnih PEI kategorija. U ovom radu, izabrane su vrednosti težinskih faktora jednake jedinici. Predmetna analiza se odnosi na hipotetičku rafineriju, tako da su i konkretni uslovi proizvodnje i lokacija neodređeni. Zbog toga, ni jedan faktor ne može imati dominantan uticaj.

Postoji osam PEI kategorija, koje se mogu podeliti u sledeće podkategorije (tabela 1) [24]:

- četiri PEI kategorije koje se odnose na direktni uticaj na životnu sredinu: zakišeljavanje, efekat staklene bašte, razgradnja ozona i fotohemijska oksidacija;
- dve PEI kategorije koja se odnose na toksičnost za čoveka: trovanje injekcionim putem i trovanje preko kože (dermalno) ili inhalacijom;
- dve PEI kategorije koje se odnose na ekotoksičnost: terestijalna i akvatična toksičnost.

Na osnovu udela PEI kategorija u PEI indikatoru moguće je zaključiti na koje faktore životne sredine proces najviše utiče. Jedini indikator za koji softverski model WAR GUI ne pokazuje uticaj pojedinačnih PEI kategorija je ukupna emitovana energije iz procesa izražena po masi proizvoda.

Tabela 1. Podela PEI kategorija
Table 1. Impact categories

PEI kategorija	Značenje
GWP	Potencijal globalnog zagrevanja
ODP	Potencijal razgradnje ozona
PCOP	Potencijal fotohemijske oksidacije
AP	Potencijal zakiseljenja
HTPI	Potencijal trovanja čoveka injekcionim putem
HTPE	Potencijal trovanja čoveka preko kože ili inhalacijom
TTP	Potencijal terestijalne toksičnosti
ATP	Potencijal akvatične toksičnosti

Vrednosti PEI kategorija su literaturni podaci. Baza podataka softverskog modela WAR GUI sadrži podatke za 1600 jedinjenja. Uzimajući u obzir kompleksnost sastava nafte i njenih derivata, u softver su umesto potpunih sastava uneti podaci na osnovu kojih se vrši proračun vrednosti PEI kategorije za dati materijal. Direktno u program su uneseni sastavi za loživi gas i tečni naftni gas. Loživi gas je metan, a tečni naftni gas je sme-

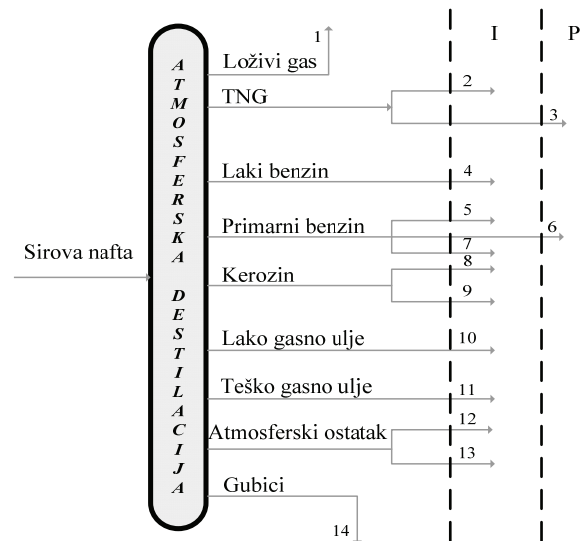
ša 5/95 propan/butan. Detaljniji odnos podaka na osnovu kojih se vrši proračun vrednosti PEI kategorije objašnjen je u tekstu koji sledi.

Za procenu vrednosti HTPI koristi se literaturni podatak o letalnoj dozi (eng. *lethal dose* – LD) koja je dovela do uginuća kod 50% eksperimentalnih životinja (pacova) direktnim ubrizgavanjem. Ovaj podatak koristi se i za procenu vrednosti TTP. Za procenu HTPE koriste se vrednosti uprosečene na dužinu izlaganja (eng. *time weighted average* – TWA) i granične vrednosti izlaganja (eng. *threshold limit values* – TLV). Podaci su dobijeni preko OSHA (*Occupational Safety and Health Administration*), ACGIH (*American Conference of Governmental Industrial Hygienists*) i NIOSH (*National Institute of Occupational Safety and Health*). Vrednost HTPE kategorije izražava se preko inverznih vrednosti TWA i TLV. Potencijal akvatične toksičnosti (ATP) procenjuje se na osnovu podatka o letalnoj koncentraciji (eng. *lethal concentration* – LC), koja izaziva uginuće kod 50% eksperimentalnih životinja (vrsta ribe *Pimephales promelas*). Vrednost ATP izražava se kao inverzna vrednost LC_{50} [4]. Podaci o GWP, ODP, PCOP i AP preuzeti su iz odgovarajuće baza podataka WAR. Napominje se, da se u slučaju potrebe, nedostajući podaci mogu obezbediti iz odgovarajućih baza [25].

PRIMER PROIZVODNJE BITUMENA

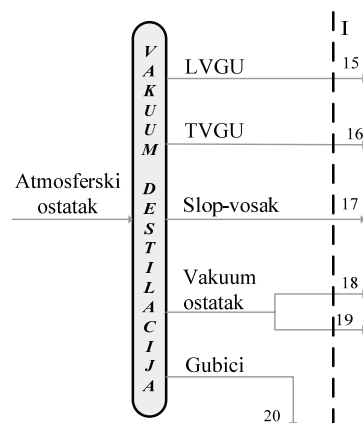
Ovaj primer sagledava proces proizvodnje bitumena u rafineriji nafte srednjeg kapaciteta prerade od 5 miliona tona sirove nafte godišnje, što odgovara kapacitetima rafinerija u Jugoistočnoj Evropi. Podaci za bilanse mase i energije preuzeti su iz literature [26–28] ili su obezbeđeni u konsultacijama sa proizvođačem bitumena u Srbiji. Proces proizvodnje bitumena započinje atmosferskom destilacijom sirove nafte. U atmosferskoj koloni se vrši razdvajanje komponenata nafte na osnovu razlike u temperaturama ključanja. Sa dna kolone izdvaja se atmosferski ostatak koji se odvodi na dalju preradu u postrojenje vakuum destilacije (slika 1). Sa dna vakuum kolone odvodi se vakuum ostatak, koji se dalje upućuje u postrojenje bitumena (slike 2 i 3). Kao otpadni materijali u sva tri stupnja javljaju se otpadni gasovi: sumpor(II)-oksid, azot(II)-oksid i drugi oksidi azota. Da bi se procenio uticaj potrošnje energije na životnu sredinu, neophodno je definisati i potrošnju električne energije po svakom stupnju proizvodnje. Električna energija dobija se sagorevanjem tečnih goriva. Utrošena električna energija u procesu atmosferske destilacije sirove nafte iznosi $2,24 \times 10^4$ MJ/h, u procesu vakuum destilacije $1,05 \times 10^4$ MJ/h i u postrojenju bitumena $1,03 \times 10^3$ MJ/h.

U tabeli 2 prikazani su maseni bilansi atmosferske destilacije, vakuum destilacije i postrojenja bitumena [1].



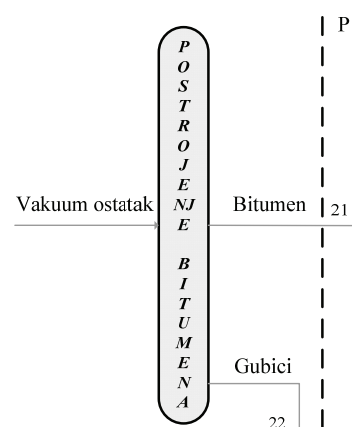
Slika 1. Šematski prikaz postrojenja za atmosfersku destilaciju nafte (I – intermedijer, P – produkt).

Figure 1. The process flow diagram – the atmospheric distillation unit (I – intermediate, P – product).



Slika 2. Šematski prikaz postrojenja za vakuum destilaciju (I – intermedijer, P – produkt).

Figure 2. The process flow diagram – the vacuum distillation unit (I – intermediate, P – product).



Slika 3. Šematski prikaz postrojenja za bitumen (I – intermedijer, P – produkt).

Figure 3. The process flow diagram – the bitumen production unit (I – intermediate, P – product).

Tabela 2. Maseni bilans procesa proizvodnje bitumena
Table 2. Bitumen production processes mass balance

Stupanj	Frakcija	CAS broj ^a	Oznaka (slike 1–3)	Protok, kg/h	Količina, t/god	
Atmosferska destilacija	Sirova nafta	8002-05-9	–	$6,31 \times 10^5$	5000000	
	Loživi gas		1	$1,25 \times 10^2$	993	
	TNG		68476-85-7	2	$8,46 \times 10^3$	42933
				3		24075
				4	$1,25 \times 10^4$	99384
	Primarni benzin	8030-30-6	5	$1,26 \times 10^5$	87128	
				6		380605
				7		527864
				8	$2,75 \times 10^4$	141471
	Kerozin	8008-20-6	9		76433	
	Lako gasno ulje	68334-30-5	10	$1,14 \times 10^5$	903384	
	Teško gasno ulje	68783-08-4	11	$6,88 \times 10^4$	545009	
	Atmosferski ostatak		64741-45-3	12	$2,69 \times 10^5$	12306
				13		2122065
Gubici	–	–	14	$4,59 \times 10^3$	36500	
Vakuum destilacija	Lako vakuum gasno ulje	64741-58-8	15	$1,90 \times 10^4$	150666	
	Teško vakuum gasno ulje	64741-57-7	16	$1,04 \times 10^5$	821239	
	Slop – vosak	68487-58-6	17	$9,11 \times 10^3$	72150	
	Vakuum ostatak		68476-33-5	18	$1,35 \times 10^5$	973085
				19		94314
Gubici	–	–	20	$1,34 \times 10^3$	10611	
Bitumen	Bitumen	64742-93-4	21	$1,18 \times 10^4$	93371	
	Gubici	–	–	22	$1,19 \times 10^2$	943

^aIdentifikacioni broj derivata (eng. *chemical abstracts service number*)

PRIKAZ REZULTATA

U tabeli 3 prikazane su ukupne vrednosti PEI indikatora za proces atmosferske destilacije nafte, vakuum destilacije i za postrojenje bitumena.

Tabela 3. Vrednosti PEI indikatora za proces proizvodnje bitumena
Table 3. The overall rate of PEI in bitumen production processes

Slučaj	AD ^a	VD ^b	PB ^c
I _{out} PEI/h	$2,14 \times 10^5$	$7,17 \times 10^4$	$2,36 \times 10^3$
I _{out} PEI/kg	0,347	0,268	0,200
I _{gen} PEI/h	$7,75 \times 10^4$	$-4,31 \times 10^4$	$-4,32 \times 10^2$
I _{gen} PEI/kg	0,125	-0,162	$-3,66 \times 10^{-2}$
I _{energy} PEI/h	54,7	45,0	4,49
I _{energy} PEI/kg	$8,86 \times 10^5$	$1,69 \times 10^{-4}$	$3,77 \times 10^{-4}$

^aAtmosferska destilacija; ^bvakuum destilacija; ^cpostrojenje bitumena

U tabelama 4–6 date su pojedinačne vrednosti PEI kategorija koje formiraju ukupnu stopu PEI indikatora za procese atmosferske destilacije nafte, vakuum destilacije i za postrojenje bitumena.

DISKUSIJA

Rezultati dobijeni primenom WAR GUI softverskog modela predstavljaju kvantifikaciju potencijalnog uticaja svakog stupnja u proizvodnom procesu dobijanja bitumena na životnu sredinu. U budućnosti bi se rezultati prikazani u ovom radu, u korelaciji sa drugim relevantnim informacijama, mogli koristiti i za procenu životnog ciklusa bitumena i proizvoda na bazi bitumena.

Kao što je već napomenuto, na osnovu vrednosti PEI indikatora moguće je proceniti potencijalni uticaj nekog proizvodnog postrojenja na životnu sredinu. Negativan predznak pojedinih PEI kategorija govori da su nastali proizvodi manje štetni od ulaznih sirovina.

Iz tabele 3 može se videti da ukupni izlazni i generisani PEI sistema u jedinici vremena imaju najvišu vrednost za postrojenje atmosferske destilacije, a najmanju vrednost za postrojenje bitumena. Odnosno, postrojenje atmosferske destilacije može imati najznačajniji uticaj na životnu sredinu. Nasuprot tome, postrojenje bitumena je ekološki najprihvatljivije. Upoređivanjem vrednosti I_{out} PEI/h i I_{gen} PEI/h za postrojenje atmosferske destilacije, dolazi se do zaključka da potencijalni štetni uticaji generisani u sistemu čine 36,21% od ukupnih izlaznih potencijalno štetnih uticaja. Istovetnom

Tabela 4. Uticaj pojedinačnih PEI kategorija na vrednost PEI indikatora u postrojenju atmosferske destilacije nafte
Table 4. Individual influence of PEI categories – the atmospheric distillation unit

Slučaj	lout PEI/h	lout PEI/kg	lgen PEI/h	lgen PEI/kg	lenergy PEI/h
HTPI	$7,41 \times 10^4$	0,12	$2,64 \times 10^4$	$4,28 \times 10^{-2}$	1,16
HTPE	$1,67 \times 10^4$	$2,71 \times 10^{-2}$	$-1,37 \times 10^4$	$-2,23 \times 10^{-2}$	$9,53 \times 10^{-2}$
TTP	$7,41 \times 10^4$	0,12	$2,64 \times 10^4$	$4,28 \times 10^{-2}$	1,16
ATP	$3,43 \times 10^4$	$5,55 \times 10^{-2}$	$2,33 \times 10^4$	$3,77 \times 10^{-2}$	2,76
GWP	3,58	$5,80 \times 10^{-6}$	3,58	$5,80 \times 10^{-6}$	1,93
ODP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCOP	$1,45 \times 10^4$	$2,34 \times 10^{-2}$	$1,45 \times 10^4$	$2,34 \times 10^{-2}$	$4,51 \times 10^{-4}$
AP	$6,01 \times 10^2$	$9,72 \times 10^{-4}$	$6,01 \times 10^2$	$9,72 \times 10^{-4}$	47,6

Tabela 5. Uticaj pojedinačnih kategorija na vrednost PEI indikatora u postrojenju vakuum destilacije
Table 5. Individual influence of PEI categories – the vacuum unit

Slučaj	lout PEI/h	lout PEI/kg	lgen PEI/h	lgen PEI/kg	lenergy PEI/h
HTPI	$2,31 \times 10^4$	$8,66 \times 10^{-2}$	$-2,78 \times 10^4$	-0,104	0,956
HTPE	$2,30 \times 10^4$	$8,62 \times 10^{-2}$	$9,97 \times 10^3$	$3,74 \times 10^{-2}$	$7,83 \times 10^{-2}$
TTP	$2,31 \times 10^4$	$8,66 \times 10^{-2}$	$-2,78 \times 10^4$	-0,10	0,956
ATP	$2,39 \times 10^3$	$8,97 \times 10^{-3}$	$2,39 \times 10^3$	$8,97 \times 10^{-3}$	2,27
GWP	1,91	$7,15 \times 10^{-6}$	1,91	$7,15 \times 10^{-6}$	1,59
ODP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCOP	27,6	$1,03 \times 10^{-4}$	27,6	$1,03 \times 10^{-4}$	$3,70 \times 10^{-4}$
AP	80,4	$3,02 \times 10^{-4}$	80,4	$3,02 \times 10^{-4}$	39,1
HTPI	$2,31 \times 10^4$	$8,66 \times 10^{-2}$	$-2,78 \times 10^4$	-0,104	0,956

Tabela 6. Uticaj pojedinačnih kategorija na vrednost PEI indikatora u postrojenju bitumena
Table 6. Individual influence of PEI categories – the bitumen production unit

Slučaj	lout PEI/h	lout PEI/kg	lgen PEI/h	lgen PEI/kg	lenergy PEI/h
HTPI	$8,91 \times 10^2$	$7,56 \times 10^{-2}$	$-1,51 \times 10^2$	$-1,28 \times 10^{-2}$	$9,46 \times 10^{-2}$
HTPE	$5,71 \times 10^2$	$4,84 \times 10^{-2}$	-5,73	$-4,86 \times 10^{-4}$	$7,75 \times 10^{-3}$
TTP	$8,91 \times 10^2$	$7,56 \times 10^{-2}$	$-1,51 \times 10^2$	$-1,28 \times 10^{-2}$	$9,46 \times 10^{-2}$
ATP	4,91	$4,17 \times 10^{-4}$	$-1,30 \times 10^2$	$-1,11 \times 10^{-2}$	0,224
GWP	0,186	$1,58 \times 10^{-5}$	0,186	$1,58 \times 10^{-5}$	0,157
ODP	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
PCOP	0,299	$2,53 \times 10^{-5}$	0,299	$2,53 \times 10^{-5}$	$3,66 \times 10^{-5}$
AP	4,82	$4,09 \times 10^{-4}$	4,82	$4,09 \times 10^{-4}$	3,87

analizom za postrojenja vakuum destilacije i bitumena, dolazi se do zaključka da se potencijalni štetni uticaji smanjuju i to u slučaju vakuum destilacije za 60,11%, a za postrojenje bitumena za 18,30%. Analizom dobijenih rezultata za ukupne izlazne i generisane PEI izražene po masi proizvoda dolazi se do istovetnih zaključaka, odnosno atmosferska destilacija nafte proizvodi najviše potencijalno štetnih uticaja na životnu sredinu. Takođe, rezultati dobijeni za ukupnu emitovanu energiju iz procesa ukazuju da je postrojenje atmosferske destilacije potencijalno najštetnije ukoliko se posmatra energija izražena kao PEI/h, a najmanje štetno ukoliko se posmatra kao PEI/kg. Postrojenje bitumena je najmanje štetno ukoliko se posmatra ukupno emitovana energija iz procesa izražena kao PEI/h, a najštetnije ukoliko se

posmatra kao PEI/kg. Vrednost ukupne emitovane energije iz procesa (lenergy PEI/h i lenergy PEI/kg) ukazuje na to da emitovana energija nema značajnijeg uticaja na životnu sredinu.

Na osnovu podataka iz tabela 2–4 moguće je detaljno analizirati aspekte životne sredine na koju postrojenje može imati najznačajniji uticaj. U sva tri stupnja proizvodnje bitumena, najviše vrednosti su za HTPI, HTPE i TTP. Odnosno, produkti koji izlaze iz sistema, kao i oni generisani u sistemu, najviše su štetni za čoveka i zemljište na kome je locirano postrojenje. Ovi rezultati su u skladu sa činjenicom da naftni derivati, pogotovo uljne frakcije, uništavaju mikrofloru zemljišta i čine ga neplodnim za duže vreme. Atmosferska i vakuum destilacija imaju izražene visoke vrednosti ATP-a, odnosno

moгу predstavljati opasnost za vodene sisteme. Vrednosti GWP i ODP su zanemarljive u sve tri faze. Vrednosti ODP su jednake nuli, što znači da proces proizvodnje bitumena ne predstavlja opasnost po razgradnju ozonskog omotača. Naime, ni u jednom od stupnjeva proizvodnje bitumena ne dolazi do emitovanja gasova u atmosferu koji opstaju u njoj dovoljno dugo da dosegnu stratosferu i pri tom u sebi ne sadrže atom halogena, koji je neophodan da bi došlo do razgradnje. U prvom stupnju proizvodnje izražene su vrednosti PCOP i AP. Ova visoka vrednost PCOP može se objasniti činjenicom da je jedan od produkata atmosferske destilacije loživi gas koji se pretežno sastoji od metana, gasa sa veoma visokom vrednošću PCOP. Visoka vrednost AP je posledica karakteristika samog postupka, tj. atmosferskom destilacijom se vrši odvajanje ugljovodoničnih frakcija nafte koji su u gasovitom stanju. U sva tri proizvodna stupnja pojavljuju se generisane PEI kategorije sa negativnim predznakom. U prvom stupnju to je generisani HTPE, odnosno nastali proizvodi su manje štetni za čoveka od ulaznih sirovina u slučaju kontakta preko kože ili inhalacijom. U drugom stupnju, negativan predznak imaju HTPI i TTP, odnosno proizvodi su manje štetni za zdravlje čoveka i zemljište u odnosu na ulaznu sirovinu. U trećem stupnju HTPI, HTPE, TTP, ATP kategorije imaju negativan predznak. Proizvodi nastali u trećem stupnju su manje štetni za čoveka, zemljište i vodene sisteme od ulazne sirovine (vakuum ostatka). U sva tri stupnja GWP, PCOP i AP generišu se u sistemu. To znači da je dominantan uticaj proizvoda, a ne sirovina na GWP, ODP, PCOP i AP. Naime, sve ulazne sirovine su u tačnoj fazi i njihovom preradom nastaju gasoviti produkti koji učestvuju u formiranju vrednosti ovih PEI kategorija. Sveukupno se može konstatovati da sva tri pomenuta stupnja u proizvodnji bitumena mogu značajno uticati na čoveka i zemljište. Pored pomenutog, atmosferska destilacija nafte bitno utiče i na zagađenje vode i vazduha, a vakuum destilacija na zagađenje vode. Upoređivanje rezultata prikazanih u ovom radu sa sličnim analizama zasnovanim na (poverljivim) industrijskim podacima, može pomoći inženjerima pri planiranju vezanom za izgradnju novih ili rekonstrukciju postojećih kapaciteta rafinerija nafte, u funkciji zaštite životne sredine.

ZAKLJUČAK

Primenom WAR GUI softverskog modela dobijene su vrednosti PEI indikatora. Vrednosti PEI indikatora ukazuju da je prvi stupanj procesa proizvodnje bitumena (atmosferska destilacija sirove nafte) najštetniji sa aspekta životne sredine. Upoređivanjem vrednosti $lout$ PEI/h i $lgen$ PEI/h za postrojenje atmosferske destilacije dolazi se do zaključka da potencijalni štetni uticaji generisani u sistemu čine 36,21% od ukupnih izlaznih potencijalno štetnih uticaja. U slučaju vakuum destilacije i postrojenja bitumena, potencijalni štetni uticaji

se smanjuju i to u slučaju vakuum destilacije za 60,11%, a za postrojenje bitumena za 18,30%. Vrednost ukupne emitovane energije iz procesa ($lenergy$ PEI/h i $lenergy$ PEI/kg) ukazuju da emitovana energija nema značajnijeg uticaja na životnu sredinu.

Na osnovu vrednosti PEI kategorija moguće je sagledati aspekte životne sredine na koju proces može imati najveći uticaj. U prvom stupnju proizvodnje bitumena dominantni štetni uticaji izraženi su kao HTPI, HTPE, TTP, ATP i PCOP. Manje je izražen uticaj na potencijal zakiseljenja, dok je ODP jednak nuli. U drugom stupnju, visoke vrednosti imaju HTPI, HTPE, TTP, ATP, dok su ostale vrednosti PEI kategorija zanemarljive. U trećem stupnju, visoke vrednosti imaju kategorije koje kvantifikuju uticaj na čoveka i zemljište. Ovaj stupanj proizvodnje ne utiče značajno na ostale aspekte životne sredine. Upoređivanje rezultata prezentiranih u ovom radu sa sličnim analizama zasnovanim na industrijskim podacima može pomoći inženjerima pri planiranju vezanom za izgradnju novih ili rekonstrukciju postojećih kapaciteta rafinerija nafte, u funkciji zaštite životne sredine.

Zahvalnica

Autori se zahvaljuju Ministarstvu nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije za podršku predmetnom istraživanju (projekat TR 34009).

Skraćenice i simboli

WAR – Algoritam za redukciju otpada (eng. *waste reduction algorithm*)

PEI – Potencijalni uticaj na životnu sredinu (eng. *potential environmental impact*)

LCA – Procena životnog ciklusa (eng. *life cycle assessment*)

LCI – Inventar životnog ciklusa (eng. *life cycle inventory*)

US EPA – Agencija za zaštitu životne sredine Sjedinjenih Američkih Država (eng. *US Environmental Protection Agency*)

$lout$ PEI/h – Ukupan izlazni PEI sistema u jedinici vremena (eng. *Overall Rate of PEI leaving a system per time unit*)

$lout$ PEI/kg – Ukupan izlazni PEI sistema izražen po masi proizvoda (eng. *overall rate of PEI leaving a system per mass of product*)

$lgen$ PEI/h – Ukupan PEI generisan u sistemu u jedinici vremena (eng. *overall rate of PEI generated within a system per time unit*)

$lgen$ PEI/kg – Ukupan PEI generisan u sistemu izražen po masi proizvoda (eng. *overall rate of PEI generated within a system per mass of product*)

$lenergy$ PEI/h – Ukupna emitovana energija iz procesa izražena u jedinici vremena (eng. *overall emitted energy from the process per time unit*)

lenergy PEI/kg – Ukupna emitovana energije iz procesa izražena po masi proizvoda (eng. *overall emitted energy from the process per mass of product*)

Ψ_k – PEI indikator (eng. *the overall potential environmental impact of chemical k*)

α_i – težinski faktor uticaja kategorije (eng. *the relative weighting factor of impact category I*)

Ψ_{ki} – PEI kategorija (eng. *the specific potential environmental impact of chemical k*)

HTPI – Potencijal trovanja čoveka injekcionim putem (eng. *human toxicity potential by injection*)

HTPE – Potencijal trovanja čoveka preko kože ili inhalacijom (eng. *human toxicity potential by either inhalation or dermal exposure*)

TTP – Potencijal terestijalne toksičnosti (eng. *terrestrial toxicity potential*)

ATP – Potencijal akvatične toksičnosti (eng. *aquatic toxicity potential*)

GWP – Potencijal globalnog zagrevanja (eng. *global warming potential*)

ODP – Potencijal razgradnje ozona (eng. *ozone depletion potential*)

PCOP – Potencijal fotohemijske oksidacije (eng. *photochemical oxidation potential*)

AP – Potencijal zakiseljenja (eng. *acidification potential*)

LD – Letalna doza (eng. *lethal dose*)

LC – Letalna koncentracija (eng. *lethal concentration*)

TWA – Vrednost uprosečena na dužinu ekspozicije (eng. *time weighted average*)

TLV – Granična vrednost ekspozicije (eng. *threshold limit values*)

OSHA – Uprava za bezbednost i zdravlje na radu (eng. *Occupational Safety and Health Administration*)

ACGIH – Američka konferencija industrijske higijene u vladinom sektoru (eng. *American Conference of Governmental Industrial Hygienists*)

NIOSH – Nacionalni institut za bezbednost i zdravlje na radu (eng. *National Institute of Occupational Safety and Health*).

LITERATURA

- [1] O. Očić, Oil Refineries in the 21st Century, John Wiley, NY, 2005, pp. 25–44, 60–68.
- [2] A. Jovanović, M. Stijepović, M. Jovanović, Analiza gubitaka isparavanja naftnih derivata na primeru auto pretačališta, Hem. Ind. **60** (2006) 239–244.
- [3] J. Jovanovic, M. Jovanovic, A. Jovanovic, V. Marinovic, Introduction of cleaner production in the tank farm of the Pancevo Oil Refinery, Serbia, J. Clean. Prod. **18** (2010) 791–798.
- [4] D. Young, H. Cabezas, Designing sustainable processes with simulation: the waste reduction (WAR) algorithm, Comput. Chem. Eng. **23** (1999) 1477–1491.
- [5] H. Cabezas, J. Bare, S. Mallick, Pollution prevention with chemical process simulators: the generalized waste reduction (WAR) algorithm—full version, Comput. Chem. Eng. **23** (1999) 623–634.
- [6] D. Young, R. Scharp, H. Cabezas, The waste reduction (WAR) algorithm: environmental impacts, energy consumption, and engineering economics, Waste Manage. **20** (2000) 605–615.
- [7] R. Smith, T. Mata, D. Young, H. Cabezas, C. Costa, Designing environmentally friendly chemical processes with fugitive and open emissions, J. Clean. Prod. **12** (2004) 125–129.
- [8] C. Cardona, V. Marulanda, D. Young, Analysis of the environmental impact of butylacetate process through the WAR algorithm, Chem. Eng. Sci. **59** (2004) 5839–5845.
- [9] T. Mata, R. Smith, D. Young, C. Costa, Environmental analysis of gasoline blending components through their life cycle, J. Clean. Prod. **13** (2005) 517–523.
- [10] N. Ramzan, S. Degenkolbe, W. Witt, Evaluating and improving environmental performance of HC's recovery system: A case study of distillation unit, Chem. Eng. J. **140** (2008) 201–213.
- [11] N. Sammons Jr., W. Yuan, M. Eden, B. Aksoy, H. Cullinan, Optimal biorefinery product allocation by combining process and economic modeling, Chem. Eng. Res. Des. **86** (2008) 800–808.
- [12] A. Bonet-Ruiz, J. Bonet, V. Ples, G. Bozga, Environmental performance assessment for reactive distillation processes, Resour. Conserv. Recycl. **54** (2010) (5) 315–325.
- [13] T. Mata, R. Smith, D. Young, C. Costa, Life cycle assessment of gasoline blending options, Environ. Sci. Technol. **37** (2003) 3724–3732.
- [14] F. Baratto, U.M. Diweka, D. Manca, Impacts assessment and tradeoffs of fuel cell based auxiliary power units Part II. Environmental and health impacts, LCA, and multi-objective optimization, J. Power Sources **139** (2005) 214–222.
- [15] F. Baratto, U.M. Diwekar, Life cycle assessment of fuel cell-based APUs, J. Power Sources **139** (2005) 188–196.
- [16] Y. Huang, R. Bird, O. Heidrich, Development of a life cycle assessment tool for construction and maintenance of asphalt pavement, J. Clean. Prod. **17** (2009) 283–296.
- [17] N. Santero, E. Masanet, A. Horvath, Life Cycle Assessment of Pavements: A Critical Review of Existing Literature and Research, SN3119a, Portland Cement Association, Skokie, Illinois, USA, 2010.
- [18] S. Sayagh, A. Ventura, T. Hoang, D. Francois, A. Jullien, Sensitivity of the LCA allocation procedure for BFS recycled into pavement structures, Resour. Conserv. Recycl. **54** (2010) 348–358.
- [19] R. Schenck, Using LCA for procurement decisions: A case study performed for the U.S. Environmental Protection Agency, Environ. Prog. **19** (2000) 110–116.
- [20] A. Hilaly, S. Sikdar, Pollution balance: a new methodology for minimizing waste production in manufacturing processes, J. Air Waste Manage. Assoc. **44** (1994) 1303–1308.
- [21] US EPA, Chemical Process Simulation for Waste Reduction: WAR Algorithm (http://www.epa.gov/nrmrl/std/cppb/war/sim_war.htm)
- [22] EPA WAR version 1.0.15. (2002)

- [23] User's guide to The Waste Reduction Algorithm Graphical, User Interface version 1.0.
- [24] R. Srinivasan, N. Trong Nhan, A statistical approach for evaluating inherent benign-ness of chemical process routes in early design stages, *Process Saf. Environ.* **86** (2008) 163–174.
- [25] D. Pennington, J. Potting, G. Finnveden, E. Lindeijer, O. Jolliet, T. Rydberg, G. Rebitzer, Life cycle assessment Part 2: Current impact assessment practice, *Environ. Int.* **30** (2004) 721–739.
- [26] B. Perišić, O. Očić, Efikasnost i efektivnost rafinerije nafte – tehnologija, energetika i ekonomika, Znamen, Beograd, 1998, str. 44–53, 59–69, 92–102.
- [27] O. Očić, Z. Gereke, Racionalnost prerade nafte. Tehnologija i energetika, Znamen, Beograd, 1995, str. 29–32.
- [28] Srbijaprojekt, Beograd, TMF, Beograd, HIP Razvoj i inženjering, Pančevo, Studija uticaja Južne industrijske zone u Pančevu na životnu sredinu, 2005, str. 157, 195, 252.

SUMMARY

WASTE REDUCTION ALGORITHM USED IN ENVIRONMENTAL IMPACT ASSESSMENT: CASE STUDY OF BITUMENE PRODUCTION

Marina A. Savić¹, Mića B. Jovanović², Jelena D. Tanasijević¹, Ozren J. Očić³, Aleksandar M. Spasić⁴, Predrag B. Jovanić⁵, Ivan D. Nikolić³

¹Innovation Centre of the Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

²Faculty of Technology and Metallurgy, University of Belgrade, Belgrade, Serbia

³Faculty of International Engineering Management, European University, Belgrade, Serbia

⁴Institute for Technology of Nuclear and Other Mineral Raw Materials, Belgrade, Serbia

⁵Institute for Multidisciplinary Research, Belgrade, Serbia

(Scientific paper)

Waste reduction algorithm (WAR) is a tool designed to help process engineers for environmental impact assessment. The WAR algorithm is a methodology for determining the potential environmental impact (PEI) of a chemical process. In particular, the bitumen production process was analyzed in the following three stages: a) atmospheric distillation unit, b) vacuum distillation unit, and c) bitumen production unit. The study was developed for a middle-sized oil refinery with a capacity of 5000000 t of crude oil per year. The results highlight the most vulnerable aspects of the environmental pollution that arise during the manufacturing process of bitumen. The overall rates of PEI leaving the system (PEI/h) – lout PEI/h are: a) 2.14×10^5 , b) 7.17×10^4 and c) 2.36×10^3 , respectively. The overall rates of PEI generated within the system – lgen PEI/h are: a) 7.75×10^4 , b) -4.31×10^4 and c) -4.32×10^2 , respectively. The atmospheric distillation unit had the highest overall rate of PEI while the bitumen production unit had the lowest overall rate of PEI. Comparison of lout PEI/h and lgen PEI/h values for the atmospheric distillation unit showed that the overall rate of PEI generated in the system was 36.21% of the overall rate of PEI leaving the system. In the cases of vacuum distillation and bitumen production units, the overall rate of PEI generated in system had negative values, *i.e.*, the overall rate of PEI leaving the system was reduced at 60.11 (in the vacuum distillation unit) and at 18.30% (in the bitumen production unit). Analysis of the obtained results for the overall rate of PEI, expressed by weight of the product, confirmed the conclusions.

Keywords: Waste reduction algorithm • Bitumen • PEI • Pollution control